

## SISTEMÁTICA PARA LA MEDICIÓN DE CAUDAL Y EL CONTROL DE LA CALIDAD DE LOS RETORNOS DE RIEGO

DANIEL ISIDORO

*Unidad de Suelos y Riegos (Unidad Asociada EEAD-CSIC)*

*Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA-DGA)*

Avda. de Montañana 930, 50059 Zaragoza (España)

[disidoro@aragon.es](mailto:disidoro@aragon.es)

### INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, como a nivel español y en Aragón, el regadío es el principal usuario de agua. El uso agrícola del agua tiene una característica que le diferencia de los demás usos (urbanos, industriales o de producción de energía) y es que consume una parte sustancial del volumen utilizado. Así, mientras que el agua empleada para usos urbanos vuelve casi íntegramente a los cauces naturales o los acuíferos (con una calidad degradada), una parte sustancial del agua agrícola se pierde por evapotranspiración a la atmósfera (ET). La fracción del agua empleada para riego que vuelve al sistema de aguas superficiales o subterráneas constituye los retornos de riego. Estos retornos presentan necesariamente una calidad inferior (concentraciones mayores de contaminantes) a la del agua de riego, al menos en 2 aspectos: (1) presentan una mayor concentración de sales; (2) presentan mayores concentraciones de agroquímicos (nutrientes y plaguicidas empleados en la agricultura intensiva de regadío). Además, los retornos de riego pueden presentar (3) mayores aportes de sólidos en suspensión; (4) mayores niveles de contaminación orgánica en áreas donde los retornos de los asentamientos rurales y las explotaciones ganaderas no son tratados (lo que es más frecuente en países en vías de desarrollo) y (5) mayores niveles de elementos pesados procedentes del lavado de los materiales del suelo-subsuelo o de los utilizados en la alimentación del ganado.

La necesidad de controlar la calidad de los retornos de riego se deriva, normativamente, de la Directiva Marco del Agua (DMA) y otras normas europeas, pero obedece sobre todo a la necesidad creciente de conocer la disponibilidad del recurso agua (en cantidad y calidad); de la que se deriva la importancia de establecer cómo afecta el regadío (como el mayor usuario del agua en la Cuenca del Ebro) a la cantidad y calidad del agua en la cuenca.

En este sentido la Comunidad General de Riegos del Alto Aragón (como las otras grandes comunidades generales de regantes de la Cuenca del Ebro) ha iniciado el control de sus retornos de riego, con el objetivo de identificar y establecer su contribución a la calidad general de los ríos que reciben esos retornos.

Este artículo pretende proporcionar a los usuarios interesados, particularmente comunidades de regantes, una guía metodológica sucinta para establecer una red de control de calidad de los retornos de zonas regables. Aunque el enfoque es general y permite orientar el diseño del muestreo a diversos objetivos, se centra sobre todo en la determinación de las masas exportadas por los retornos de riego, dado que es la masa de contaminantes en esos retornos la que determinará su efecto sobre la masa de agua receptora, tal como se explica en uno de los artículos acompañantes en este monográfico. También se centra sobre todo en las aguas superficiales, dado que en general los retornos de los grandes regadíos de la cuenca son superficiales.

### 1. Cómo se diseña un plan de muestreo

El control de la calidad de los retornos de riego (RR) implica tomar una serie de muestras, en las que se analizarán una serie de parámetros de calidad, con una cierta periodicidad en unas ubicaciones determinadas (y medir el caudal, en el momento de muestreo al menos, en el caso de masas); más luego analizar estadísticamente los resultados obtenidos, evaluarlos en relación a las normas de calidad, y presentarlos de una manera informativa. Cualquiera de los pasos anteriores deberá elegirse en función de los objetivos del muestreo y llevarse a cabo según un plan definido de antemano (aunque pueda modificarse sobre la marcha según se vayan identificando problemas u objetivos nuevos). Los pasos de un plan de muestreo se detallan en la Figura 1 y se exponen a continuación.



Figura 1. Pasos a seguir en la definición y ejecución de un plan de muestreo de las aguas de retorno de riego.

### 1.1. Definición de los objetivos

El plan de muestreo que se diseñe deberá responder a unos objetivos concretos fijados de antemano. No diseñaremos, por ejemplo, el mismo plan de muestreo para determinar la masa total de nitrógeno exportada por una zona regable que para establecer las diferencias entre las concentraciones máximas de plaguicidas dentro de esa zona y sus relaciones con los cultivos dominantes (en el primer caso el diseño del muestreo consistiría en una sola estación en algún punto a la salida de la zona regable en el que se muestrearían periódicamente las concentraciones de nitrógeno y se medirían los caudales; en el segundo deberán seleccionarse varios puntos de control en los que se medirán, únicamente, las concentraciones de los plaguicidas de interés y se deberían determinar los cultivos dominantes en las cuencas de esos puntos de control).

Algunos de los principales objetivos posibles de un plan de seguimiento de los retornos de riego son:

a) *Reconocimiento.* Un primer objetivo de un muestreo puede ser obtener una información preliminar sobre la cantidad y calidad de los retornos de riego dentro de un sistema

regable. Para este objetivo la frecuencia de muestreo puede ser baja; en cambio, resulta conveniente identificar los puntos con mayor caudal y muestrear el mayor número posible de ellos. Los análisis se deben orientar hacia los contaminantes más generales en los retornos de riego: salinidad, nutrientes y, según la disponibilidad de presupuesto, plaguicidas; y será necesario aforar los desagües en el momento de muestreo.

b) *Establecer el nivel de concentración de contaminantes en las aguas de retorno,* para ver si cumplen con los valores fijados en las normas (las normas de calidad ambiental de la DMA, por ejemplo). Es un objetivo conservador pues no permite evaluar el efecto de los retornos sobre las masas de agua que los reciben, sino únicamente la calidad de esos retornos y si cumple o no ciertos criterios. En cuanto a los análisis a efectuar, se analizarán las sustancias contempladas en las normas en cuestión.

c) *Determinar las masas de contaminantes exportadas.* Este punto es más importante porque la masa de contaminante exportada

es la que determina el efecto sobre el cauce receptor. Es más ambicioso que la simple toma de muestras porque necesita de la determinación de los caudales (Q). La exigencia de la DMA de desglosar la contribución de cada usuario del agua (agrícola, urbano e industrial, al menos) a la contaminación de las aguas, hace necesario determinar también el volumen de los RR para conocer las masas de contaminantes exportadas.

- d) *Establecer la calidad ecológica de las aguas.* Mientras que la determinación de los parámetros físico-químicos tradicionalmente controlados en las aguas (salinidad, nutrientes o plaguicidas) es una tarea sencilla en cuanto al muestreo en sí (analíticamente el análisis de plaguicidas es más complicado, y mucho más caro); el muestreo para la determinación de la calidad ecológica de las aguas es un proceso más complejo y en laboratorio requiere de personal especializado.
- e) *Establecer series largas de calidad y masa de contaminantes.* Más que un objetivo en sí, el propósito de generar esas informaciones es buscar relaciones causa-efecto, mediante la comparación de distintas cuencas o mediante la comparación de la evolución de la calidad (y cantidad) de los RR y el uso del territorio (tipología de cultivos o sistemas de riego, volúmenes de riego y precipitación, explotaciones ganaderas o industriales, etc.). Supone un esfuerzo de dedicación y una constancia importante por parte de las comunidades de regantes, que muchas veces sólo las grandes comunidades generales pueden asumir.

En cualquier caso, sobre todo dentro de este último objetivo general, el diseño de la red de muestreo se basa en un modelo conceptual previo del sistema a estudiar (por ejemplo, que las concentraciones máximas de nitrato siguen a los periodos de máximas aplicaciones de fertilizantes o que las cuencas con mayor nivel de fósforo son las que presentan un mayor número de explotaciones ganaderas; hipótesis razonables a priori). Los resultados del seguimiento permitirán aceptar o rechazar el modelo propuesto, y en caso de rechazarlo, nos forzarán a seguir indagando en las causas reales de las concentraciones observadas o en los fenómenos que modifican los resultados esperados; o a analizar las razones por las que el modelo propuesto no ha sido capaz de detectar y confirmar la hipótesis propuesta (una baja frecuencia de muestreo que no permite detectar los episodios de máximas concentraciones de nitrato, por ejemplo) y, en su caso, a modificar el plan de muestreo.

## 2. Diseño del plan de muestreo

El diseño del plan de muestreo incluye (1) decidir los parámetros a analizar; (2) establecer la ubicación de la estación o estaciones de muestreo; (3) decidir la frecuencia de muestreo y el periodo en el que se va a muestrear y con ello el número de muestras. Lógicamente el presupuesto disponible para el muestreo es el que condiciona tanto el número de muestras totales, como el de análisis de laboratorio y el de desplazamientos al campo; por lo que la definición del plan de muestreo deberá contar con la disponibilidad presupuestaria y priorizar entre los posibles puntos y frecuencias de muestreo o parámetros a analizar.

### 2.1. Parámetros a analizar

- *Salinidad:* La salinidad normalmente se mide como la conductividad eléctrica (CE) que está muy bien relacionada, en cada curso de agua, con los sólidos disueltos totales (SDT, la salinidad). La CE es de lectura inmediata, fácil y barata, en un conductímetro. Los SDT deben determinarse mediante análisis iónico completo en un cierto número (> 10) de muestras en todo el rango de CE registrado para establecer la relación SDT-CE. Los SDT pueden aproximarse mediante el residuo seco (RS), la masa que del precipitado que queda después de evaporar 1 L de solución filtrada. Dado que el agua de drenaje ha de evacuar al menos las sales aportadas con el agua de riego (para prevenir la salinización del suelo), la salinidad de los RR siempre es superior a la del agua de riego y es un parámetro importante a controlar; aún más en terrenos con presencia de sales o yeso en el suelo o el sub-suelo, como es frecuente en la Cuenca del Ebro.

- *Nitrógeno:* el nitrógeno (N) suele presentarse principalmente en forma de nitrato ( $\text{NO}_3$ ), siendo la concentración de amonio ( $\text{NH}_4$ ) apreciable solo en situaciones de contaminación orgánica fuerte; el nitrito ( $\text{NO}_2$ ) es una forma de transición que se presenta en concentraciones mínimas, normalmente se suele dar la concentración de  $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$  conjuntamente. El N procede sobre todo de la fertilización mineral y orgánica de los suelos agrícolas, su control en los RR es de gran interés.

- *Fósforo:* se presenta disuelto (sólido disuelto total, PDT, fundamentalmente como fosfato) y, sobre todo, adsorbido a las partículas en suspensión, por lo que es importante analizar siempre el fósforo total (PT) y complementariamente, el PDT. Como el N, el P es un nutriente esencial que procede sobre todo de la fertilización y tiene mucho interés por su efecto sobre la eutrofización de las aguas. Tanto el P como el N son elementos muy importantes a controlar en los RR.

- *Sólidos en suspensión (SS, sedimentos)*: se determinan mediante filtración. La presencia de SS indica procesos erosivos (en regadío, serían más frecuentes en riego por aspersión de terrenos con pendientes fuertes, con pluviometrías superiores a la capacidad de infiltración del suelo). Aunque no son un parámetro tan importante como la salinidad, los SS pueden llevar adsorbidos otros contaminantes de interés como fósforo, plaguicidas y metales pesados.

- *Plaguicidas*: como se describe en otro artículo de este monográfico, los plaguicidas son importantes por sus efectos tóxicos (para el hombre y el medio ambiente), por su persistencia y por el fenómeno de la bioacumulación. Eso hace interesante el control no solo de los incluidos en la DMA sino de otros de uso generalizado. Además, conforme se van conociendo sus efectos muchos plaguicidas van siendo prohibidos; pero su persistencia en el medio hace que se sigan registrando mucho tiempo después de cesar su aplicación. Dada la complejidad del comportamiento de los plaguicidas, su seguimiento debería efectuarse, para un buen control, no solo en las aguas sino también en los sedimentos y en los seres vivos del medio (biota), lo que complica notablemente su seguimiento. Son importantes en los RR.

- *Metales pesados*: los metales pesados más frecuentes son arsénico (metal traza en realidad), cadmio, cromo, mercurio, níquel, y plomo, y en zonas ganaderas, cobre. Están asociados sobre todo, en agricultura, a la presencia de explotaciones ganaderas, pues algunos se usan en la alimentación de ganado, como el cobre; por tanto, su control es más importante en áreas de ganadería intensiva (aunque es mucho más frecuente que tengan un origen industrial o minero). En algunos casos el agua de drenaje puede lavar metales pesados (como el arsénico) de los materiales subterráneos que atraviesa, pudiendo originar problemas ambientales graves en las zonas de descarga. En zonas sin actividad minera o de ganadería intensiva, el control de los metales pesados puede ser interesante en una primera fase, para comprobar su presencia, y una vez descartada se puede prescindir de él. Al igual que los plaguicidas es interesante su seguimiento en los sedimentos, ya que tienden a adsorberse en las partículas (generalmente solo se movilizan y pasan a disolverse en el agua a pH bajos).

## **2.2. Ubicación de las estaciones o puntos de muestreo**

Para controlar la calidad de los RR, los puntos de muestreo deben seleccionarse en colectores aguas debajo de las zonas regables de interés, en el caso de aguas superficiales. Las características que debe

reunir un punto de muestreo sobre un colector superficial para el control de los RR son: (1) Que la mayor parte posible de su cuenca de recepción se encuentre bajo regadío, de manera que las aportaciones originadas por el secano sean mínimas (si no los son, será necesario estimarlas o medirlas para establecer la contribución atribuible únicamente al regadío); (2) Que el acuífero superficial, asociado al regadío, no esté conectado con otros acuíferos (puesto que entonces parte de los RR se incorporaría a ese acuífero y no se controlaría en el drenaje superficial); (3) Que el acuífero superficial, asociado al regadío descargue fundamentalmente al colector, es decir, que no se presente un flujo de salida por debajo del cauce (generalmente en el mismo sentido que el mismo y asociado a sus depósitos aluviales); (4) Que no haya incorporaciones de afluentes inmediatamente aguas arriba del punto de muestreo que puedan provocar que el agua no presente la misma calidad en toda la sección; y (5) Que sea un lugar de fácil acceso.

En el caso de RR subterráneos la calidad puede monitorizarse mediante el muestreo de pozos, mientras que el volumen de los RR puede estimarse a partir de los otros términos del balance hídrico (riego, precipitación y ET; lo que siempre es solo una aproximación) o a partir de las propiedades del acuífero (espesor saturado y conductividad hidráulica) y los niveles piezométricos medidos en un cierto número de pozos en la zona de estudio y sus alrededores.

## **2.3. Frecuencia de muestreo y número de muestras**

La frecuencia de muestreo depende, en principio, de la variabilidad temporal del parámetro a controlar (el  $\text{NO}_3$ , por ejemplo, se lava rápidamente y procede sobre todo de las aplicaciones de fertilizantes, luego para identificar los picos en la concentración de  $\text{NO}_3$  sería necesario un muestreo al menos semanal o quincenal durante los periodos de fertilización).

Para obtener el valor medio de una concentración (como para estimar el valor medio anual, MA, definido en la DMA), el número de muestras necesario está relacionado estadísticamente con la varianza (una medida numérica de la variabilidad) de esa concentración y una vez estimada esa varianza (con un muestreo previo) se puede inferir el número de muestras necesario (y por ende la frecuencia de muestreo) para un margen de error prefijado.

Para medir las masas exportadas se hace necesario, además de medir el caudal de salida, determinar la concentración con una frecuencia elevada. Las mismas consideraciones estadísticas que para las concentraciones pueden emplearse para las masas diarias calculadas (una vez que se han calculado las masas durante un cierto periodo, para tener una

estimación previa de la varianza) y definir así el número de medidas de las masas necesario.

El muestreo puede realizarse en el tiempo según varias estrategias, las más usuales: (1) Distribuyendo el número de muestras requerido uniformemente en el periodo deseado, empezando en un día elegido al azar (muestreo sistemático), es lo más usual para determinar masas exportadas o detectar incumplimientos; (2) Muestreando en algunos días elegidos al azar dentro de un periodo determinado, como en cada mes (muestreo aleatorio por bloques), adecuado para estudios de reconocimiento; (3) Muestreando con distinta frecuencia según el caudal circulante (mayor en los periodos de caudales más altos), que es el método más preciso para establecer masas exportadas, que dependen muy fuertemente de  $Q$  (muestreo estratificado).

Finalmente, aunque los RR se originan fundamentalmente durante la estación de riego, el drenaje de las zonas regables se sigue produciendo normalmente durante un cierto tiempo después de la estación (mientras se produce el drenado del acuífero asociado al regadío). Además, los nutrientes y plaguicidas aportados a los cultivos de regadío (generalmente durante la estación de riego o antes de ésta), pueden lavarse después, durante el invierno o la primavera siguiente, de manera, que los contaminantes exportados fuera de la estación de riego sí tienen su origen, al menos en parte, en el regadío. Por todo ello, la contaminación inducida por el regadío se debe medir durante todo el año hidrológico.

### 3. Muestreo

Una vez definido el plan de muestreo (ubicación de los puntos de muestreo, parámetros a analizar y frecuencia y duración de muestreo) procede la realización del muestreo en sí. Es importante reflejar el plan de muestreo en un *Protocolo escrito* que sirva de guía a los encargados del muestreo en campo. El protocolo debe reflejar las muestras a tomar y mediciones a efectuar en cada punto de muestreo y las precauciones y medidas de conservación a tomar con cada muestra. También es importante reflejar las operaciones de muestreo en un cuaderno de campo que recoja las incidencias en cada punto, resultados de las mediciones in situ, etc. En el caso más general, puede ser necesario medir el caudal y tomar muestras; a continuación se dan las pautas para las dos actividades.

#### 3.1. Medida de caudales

En el caso de que el muestreo pretenda determinar las masas de contaminantes exportadas se hace necesario evaluar, junto con la concentración de contaminante, el caudal de salida. La medición del caudal puede efectuarse en secciones del cauce expresamente preparadas para ello (secciones de

control) en las que la relación entre caudal  $Q$  y altura de la lámina de agua ( $H$ ) queda definida unívocamente o mediante mediciones puntuales del caudal en el punto de muestreo. Para disponer de un registro continuo de caudales (imprescindible para calcular las masas exportadas) es necesario recoger los datos de altura de la lámina de agua (directamente transformables a  $Q$  en las estaciones de aforo) de modo continuo, mediante registros en papel, o preferiblemente, en formato digital

##### 3.1.1. Estructuras de medida de caudal en cauces (secciones de control)

La construcción de secciones de aforo implica una obra civil importante cuya autorización administrativa corresponde a las Confederaciones Hidrográficas y que requiere ciertas precauciones especialmente en cuanto al cálculo de los caudales máximos esperables, lo que hace conveniente que el diseño de la estación lo realicen empresas de ingeniería.

Una vez conocidas las condiciones de trabajo (el rango de caudales que deberá medirse) y la geometría del emplazamiento, el cálculo de la sección de aforo puede realizarse mediante programas de cálculo, como Winflume ([http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics\\_lab/winflume/](http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/winflume/)) aunque siempre es preferible que lo realice personal cualificado.

El emplazamiento ideal de una estación de muestreo requiere un tramo suficientemente largo más o menos recto aguas arriba y abajo del emplazamiento y, en general, un desnivel suficiente en la solera del cauce (para permitir una caída lo más libre posible aguas abajo, de manera que no se produzca "entibo" y se alteren las condiciones de medida cuando se acumula agua aguas abajo). El tipo de vertedero elegido depende de las condiciones del flujo: para caudales elevados con suficiente desnivel, los vertederos de pared ancha (un realce suave de la solera con o sin un estrechamiento lateral, Fig. 2.a) resultan adecuados y también los aforadores tipo Parshall, estandarizados. Éstos además permiten operar con el vertedero "ahogado", es decir, cuando el nivel del agua aguas abajo no permite una descarga libre, midiendo la altura en dos ubicaciones en lugar de una sola (Fig. 2b). Cuando el desnivel es muy reducido y la velocidad de aproximación pequeña (si no lo es, lo más adecuado es reducirla construyendo una zona de remanso y reteniendo el agua con una palca deflectora), los vertederos de pared estrecha son muy apropiados (Fig. 2.c). Los vertederos triangulares son más sensibles a las diferencias de altura (más precisos) y son más aptos para caudales pequeños; los vertederos rectangulares suelen emplearse para caudales más altos.

En todas las instalaciones, un pozo de remanso conectado a la sección de control permite ubicar el dispositivo de medida de altura de la lámina de agua (limnógrafo; Fig. 5.a)



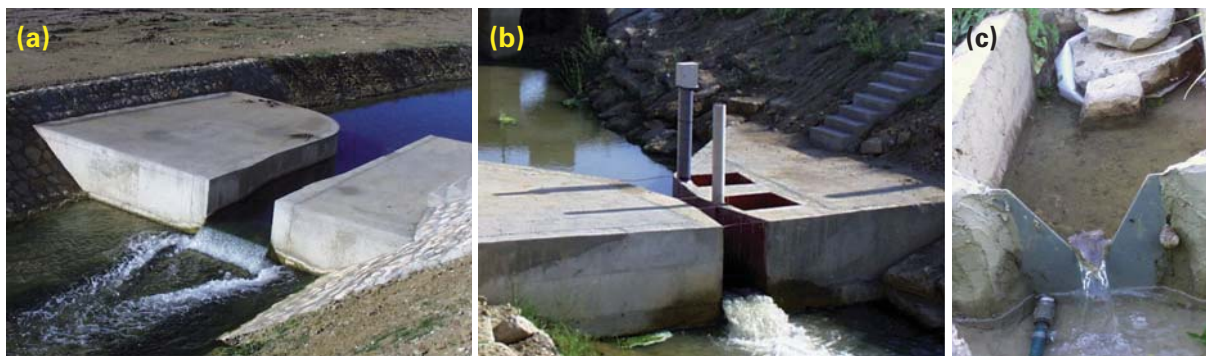


Figura 2. Estaciones de aforo de RR en la Comunidad General de Regantes del Alto Aragón: (a) Vertedero de pared ancha con realce de solera y contracción lateral [Barranco de Las Filadas] y (b) Aforador tipo Parshall [Colector C-6, Grañén]; (c) Vertedero triangular de pared delgada, a la salida de un dren enterrado en Almudévar.

### 3.1.2. Medida del caudal en cauces naturales

Cuando no se dispone de una sección de control (con una relación bien definida entre  $Q$  y  $H$ ), como es el caso de cauces irregulares de azarbes, para determinar el caudal por un punto de un cauce debe definirse la sección en ese punto y se debe medir la velocidad del agua en la misma. El aparato más utilizado para medir la velocidad es el molinete que permite medir el número de revoluciones de una hélice en una cierta posición dentro del cauce que está directamente relacionado con la velocidad del agua en ese punto (Fig. 3).

Para realizar el aforo con molinete se establece en primer lugar la forma de la sección mojada del cauce (lámina de agua,  $L$ , y profundidad en una serie de puntos distribuidos uniformemente, a ser posible, a lo ancho del cauce,  $H_i$ , y alcanzando lo más cerca posible de las márgenes; Fig. 4.a). En cada una de las verticales donde se miden las profundidades  $H_i$  se medirán las velocidades  $V_{0,2}$  a una altura sobre la solera de  $1/5 \cdot H_i$  y  $V_{0,8}$  a una altura de  $4/5 \cdot H_i$ . La

media de ambas velocidades se toma como media de la velocidad del agua en esa vertical. Cuando la lámina de agua en la vertical es demasiado baja ( $H_i \leq 15$  cm) se mide la velocidad  $V_{0,4}$  únicamente a una altura de  $2/5 H_i$  que se toma como velocidad media por esa vertical (Fig. 4b).

El caudal  $Q_k$  a través de cada dovola, el espacio entre dos verticales de medida o entre una media extrema y la margen, se calcula a partir de las medidas de la sección ( $S_k$ ) y la velocidad media en cada dovola ( $V_k$ ), mediante diversos procedimientos, uno de los más recomendados (Fig. 4.a) es obtener  $Q_k$  como se indica en la Figura 4.a y el caudal total ( $Q$ ) se obtiene como la suma de los caudales parciales ( $Q_k$ ) en cada.

Además de los molinetes existen otros tipos de aparatos (basados en el efecto doppler de los ultrasonidos; *velocimetría doppler acústica*) que permiten establecer la velocidad media sobre una o varias verticales dentro del ancho del cauce y, una vez introducida la definición de la sección, extender el perfil de velocidades a toda ella. Este tipo de



Figura 3. Medida del caudal en cauces naturales mediante el uso de molinete.

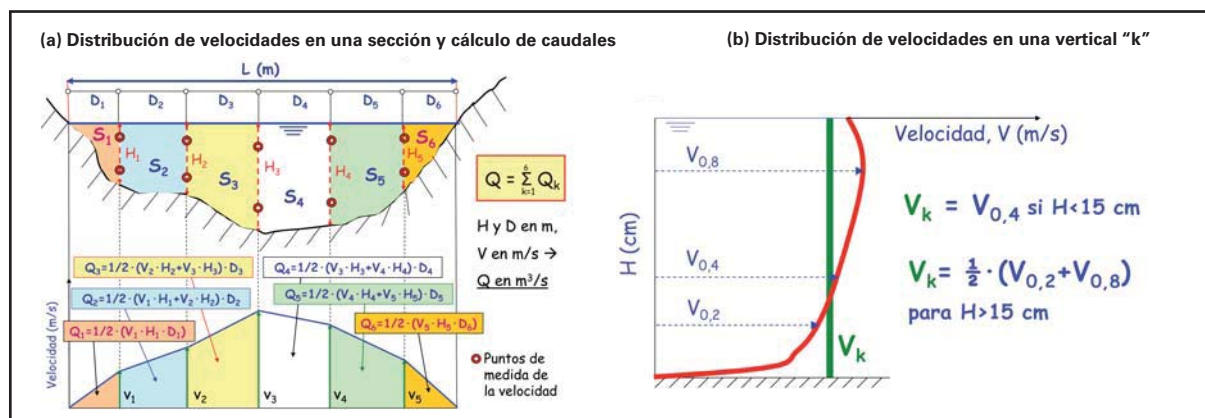


Figura 4. Cálculo del caudal y distribución de velocidades en cauces naturales.

aparatos permiten una medición más rápida de las velocidades y, en general, almacenar las lecturas en formato digital, lo que puede facilitar mucho los trabajos de aforo. Pero normalmente son más adecuados para secciones regulares donde pueden permanecer instalados y tomar registros continuos de velocidad y altura (sin que sea necesaria una sección de control, pues se mide V y H). Para cauces irregulares, no suponen una ventaja sobre la medición con molinete. Otra técnica, más adecuada para la medición del caudal en cauces irregulares, consiste en la utilización de trazadores (colorantes, isótopos radiactivos o elementos químicos poco frecuentes en las aguas naturales). Éstos se añaden en una cantidad conocida (o se introducen en el cauce en un flujo de caudal y concentración conocidos) y su concentración se mide aguas abajo, a una distancia suficiente para que su mezcla con los RR haya sido completa. Conocida la masa añadida, las concentraciones del trazador aguas abajo permiten establecer el caudal de los RR.

### 3.2. Toma de muestras

La toma de muestras requiere una serie de precauciones según el tipo de análisis que se vaya a efectuar con ellas. Cuando las muestras se toman a mano, directamente del cauce, hay que asegurarse de tomarlas en un punto donde el agua está en movimiento y de no contaminar la muestra; para ello, es necesario no remover los sedimentos del fondo al tomar la muestra y se aconseja lavar el bote 3 veces con el agua a muestrear. Con los muestreadores automáticos, de la misma manera, hay que buscar que la boca de succión se encuentre en un punto del cauce donde el agua fluya adecuadamente. Algunas precauciones en la toma de muestras:

- Salinidad: Las muestras para CE o SDT (análisis de los iones principales) no requieren medidas especiales de conservación. Pueden utilizarse botes

de plástico de un volumen suficiente (100 mL) y las muestras pueden permanecer en los muestreadores o en laboratorio sin necesidades especiales de conservación (aunque siempre es preferible la conservación en frío, 4°C, y en algunos casos se ha observado la disminución de la salinidad por precipitación de carbonatos). Para el RS se necesita un volumen de al menos 1 L, sin necesidades especiales de conservación.

- Sólidos en suspensión: Es necesario un volumen elevado de muestra (> 1 L) ya que la determinación se hará por filtración, sin necesidades de conservación específicas. En cauces profundos, la concentración de SS puede variar con la profundidad.

- Nitrato: suele recomendarse que las muestras para  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_4$  se analicen rápidamente (y que se conserven en frío, 4°C) para evitar la transformación del N por la actividad microbiana. Pero lo más frecuente es que el N se presente (casi) exclusivamente como  $\text{NO}_3$  y no se degrade con el tiempo y solo en situaciones de contaminación orgánica fuerte (o si se observa una disminución del  $\text{NO}_3$  con el tiempo) es necesario observar estas precauciones.

- Fósforo: se degrada muy rápidamente y se adsorbe a las paredes de los botes de plástico, por lo que es necesario emplear botes de vidrio ámbar (250 mL) o bien acidificar la muestra hasta pH = 3 en el momento de muestreo.

- Plaguicidas: interaccionan con el plástico y se degradan muy rápidamente por lo que es necesario utilizar botes de vidrio ámbar; por lo complejo de su analítica se requiere un volumen elevado de muestra (2 L). Para el reciclado de los botes es necesario lavarlos cuidadosamente entre muestreos (igual que para el P).

- Metales pesados: al revés que los plaguicidas, se recomiendan botes de plástico (particularmente teflón) pues se adhieren al vidrio y se intercambian con los metales del mismo. Es necesario un volumen elevado de muestra ( $> 250$  mL) dada su baja concentración, recomendándose tomar muestras dobles para concentraciones muy bajas. Acidificar las muestras ( $\text{pH} < 2$ ) ayuda a mantener los metales en disolución.

Los muestreadores automáticos (Figs.5.a. y 5.b) son aparatos que toman muestras con la periodicidad que se desee, incluso combinando diversas tomas en una misma muestra (muestras compuestas), y permiten reducir así el número de salidas al campo. Los contaminantes muestreados no deben ser, en principio, degradables pues al quedar un tiempo prolongado en el campo las muestras recogidas no serían representativas del momento de muestreo. Para el muestreo de ese tipo de contaminantes degradables (plaguicidas, fósforo) existen equipos con botellas de vidrio de mayor capacidad y sistemas de refrigeración incorporados (con conexión a la red eléctrica generalmente), lógicamente de un mayor coste.

#### 4. Análisis de laboratorio

Los parámetros a analizar dependen de los objetivos del plan de muestreo. En general, cuando se trata de controlar la calidad de los retornos de riego serán parámetros de interés la salinidad total (medida como sólidos disueltos totales o como con-

ductividad eléctrica, directamente relacionada con la salinidad y más fácil de determinar), los nutrientes (nitrógeno, especialmente en forma de nitrato; y fósforo, generalmente fósforo total) y para estudios más detallados, los plaguicidas.

En laboratorios cualificados (como los homologados) se toman una serie de precauciones para garantizar la calidad de los análisis, como son el análisis de duplicados de muestras (para garantizar la precisión de los métodos de muestreo), la medición de blancos, antes y después de la toma de muestra (para asegurar que el proceso de toma de muestras no influye sobre los resultados; esto es particularmente importante en compuestos que se encuentran en concentraciones muy bajas, como los plaguicidas, o que pueden interaccionar con los materiales de muestreo, alterando su concentración, como el fósforo).

En cualquier caso, es conveniente enviar a los laboratorios externos muestras duplicadas que permitan comprobar que los resultados que se obtienen son similares y así garantizar la calidad de los resultados y también muestras de comprobación, con una concentración conocida, para comprobar que los resultados del laboratorio se ajustan a los valores reales.

#### 5. Interpretación de los resultados

Para obtener la mayor información posible de los resultados de un muestreo es necesario contar con la colaboración de personal especializado y tener un conocimiento preciso de los factores que afectan a

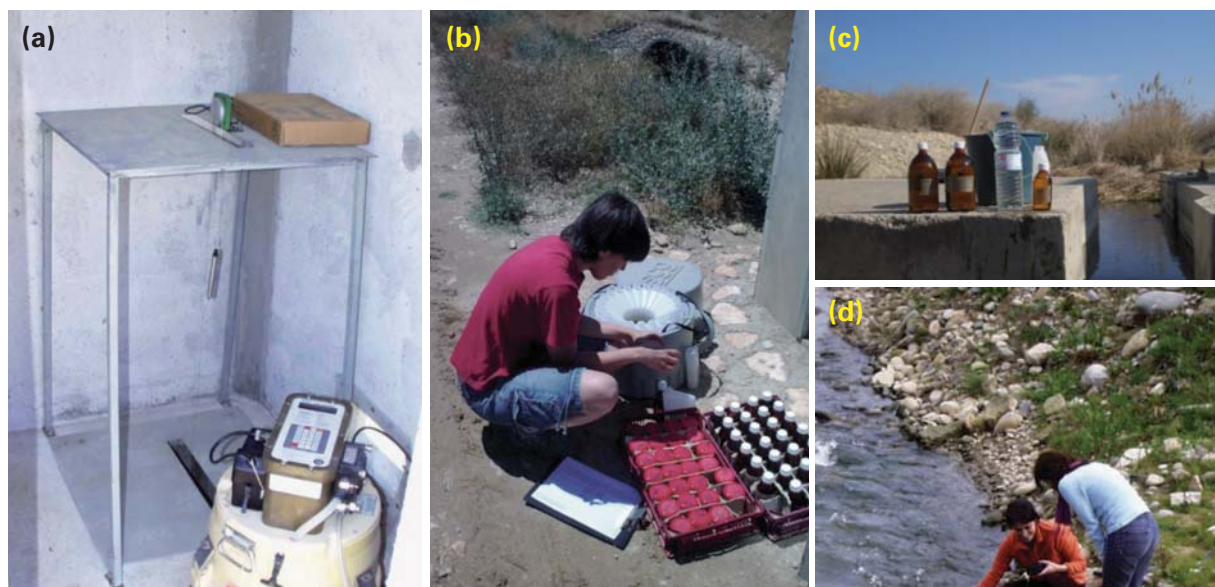


Figura 5. (a) Muestreador automático y limnógrafo en el interior de una caseta de aforo; (b) Recogida de las muestras del muestreador para su traslado al laboratorio; Muestreo manual: (c) Botes de vidrio ámbar para análisis de plaguicidas (2 L) y fósforo (250 mL) y de plástico para análisis de sólidos disueltos y en suspensión (1.5 L) y salinidad y nitrato (100 mL); (d) Medida de la conductividad eléctrica directamente en un cauce.



la cuenca en estudio: prácticas agrícolas y de riego, inventario ganadero, presencia de industrias o núcleos urbanos, flujos subterráneos, características de los suelos y de los materiales geológicos, etc. Ese conocimiento es imprescindible para extraer conclusiones, aún provisionales, sobre las causas de la contaminación observada y las posibles medidas de control.

El análisis de los resultados debe ponerse en relación con nuestras hipótesis previas sobre el sistema (cualesquiera que fuesen, por ejemplo: que la superficie cultivada de maíz se relaciona con el  $\text{NO}_3$  exportado, que las concentraciones más elevadas de PT se producen tras los periodos de lluvias intensas, que la mayor salinidad se presenta en áreas de suelos con problemas de salinidad, que en las cuencas regadas por aspersión se exportan masas menores de sales que en las regadas por superficie, etc.) y servir para confirmarlas o refutarlas y buscar nuevas explicaciones a las observaciones. El análisis estadístico de los resultados, en cuanto a concentraciones o masas, permitirá decidir si el número de muestras utilizadas ha sido suficiente (para obtener los parámetros buscados con la precisión necesaria) o por el contrario, si se ha quedado corto; y por tanto modificar la frecuencia de muestreo para el futuro. Ese proceso de revisión debe mantenerse en el tiempo, dado que conforme aumenta el número de muestras disponibles, se conoce mejor la varianza de los parámetros de interés y se puede definir mejor el número de muestras necesario.

Una parte de la interpretación de los datos que no debe descuidarse es la elaboración de informes que recojan (1) los resultados obtenidos (incluyendo una descripción previa del muestreo y si se han cumplido los objetivos del plan propuesto) y una elaboración estadística de los mismos (valores medios, varianza y evolución temporal); (2) la comparación de los valores de concentraciones con los niveles de referencia (valores medios en relación a las MA y valores máximos en relación a las CMA de la DMA, o con otras normas de interés, como las de

aguas potables o los niveles guía para eutrofización) y con los obtenidos en otros sistemas comparables; y (3) la explicación de los resultados obtenidos en relación a los usos del suelo y el manejo del riego y los cultivos en las cuencas estudiadas, las condiciones meteorológicas de ese año y cualesquiera otros factores aplicables (confirmación o rechazo de nuestras hipótesis previas, si las hubiera).

## 6. Diseminación de los resultados

Finalmente, es importante poner a disposición del público los resultados de los proyectos de seguimiento por una doble razón: porque es una información ambiental de interés para todos (agricultores, posibles usuarios y conservacionistas) y porque sirve para poner en valor el esfuerzo de las comunidades de regantes en el control de la calidad de las aguas y para que otros grupos de interés o de investigación conozcan los trabajos que se realizan y puedan emprender colaboraciones con las comunidades de regantes.

La diseminación de los resultados puede llevarse a cabo en publicaciones periódicas, como este número monográfico de Riegos del Alto Aragón donde se resumen algunos de los resultados de la red de seguimiento establecida por la Comunidad General, o en informes anuales o de proyecto, o mediante presentaciones en otros foros, como los Congresos Nacionales de Comunidades de Regantes. Cuando se encarga (a una empresa o agente externo) el control de los retornos es una práctica recomendable establecer un calendario de presentación de informes provisionales con los resultados previos obtenidos hasta ese momento (siempre entendiendo que el análisis detallado de los datos puede llevar a la eliminación de algunas muestras o alterar ligeramente esos resultados provisionales). La divulgación de los resultados entre la comunidad científica, en los Congresos Nacionales de Riegos, por ejemplo, puede despertar el interés de grupos de investigación y dar pie a colaboraciones futuras.